



Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive

Thanh Hoang, Pierre-Thomas Dautre, Guy Prudhomme, Philippe René Marin, Franck Pourroy, Frédéric Vignat

► To cite this version:

Thanh Hoang, Pierre-Thomas Dautre, Guy Prudhomme, Philippe René Marin, Franck Pourroy, et al.. Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive. 14ème Colloque National AIP PRIMECA, Mar 2015, La Plagne, France. hal-01236565

HAL Id: hal-01236565

<https://hal.science/hal-01236565>

Submitted on 8 Dec 2015

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Place du prototype dans l'étape d'analyse d'un processus de reconception de pièce pour une fabrication additive

Thanh Hoang VO, Pierre Thomas DOUTRE,
Guy PRUDHOMME, Philippe MARIN,
Franck POURROY, Frédéric VIGNAT

Univ. Grenoble Alpes, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France
CNRS, G-SCOP, F-38000 Grenoble, France

Résumé— *La fabrication additive est une technologie émergente pour la réalisation de pièces mécaniques en matériaux métalliques. Elle permet de pouvoir obtenir des formes non réalisables par les procédés traditionnels. Se pose alors la question des formes réalisables et du processus de leur conception. En nous appuyant sur le modèle de l'Axiomatic Design, nous étudierons plus particulièrement dans ce texte la phase d'analyse d'une proposition de solution au regard des performances attendues par la pièce. Nous focalisons sur la place des représentations du produit pour supporter cette analyse, et plus particulièrement sur la place du prototype. A partir d'une étude de cas de reconception réalisée en partenariat avec une entreprise du domaine de l'aéronautique, nous mettons en évidence l'importance de trois représentations qui permettent aux différents acteurs du cycle de vie du produit d'évaluer les propositions issues de la phase de synthèse : le modèle CAO, la représentation issue du calcul par éléments finis et le prototype. Notre travail permet notamment de caractériser l'intérêt de chaque représentation pour cette évaluation. Le prototype apparaît comme un moyen incontournable d'évaluation dans ce contexte centré optimisation et dans l'état actuel de nos connaissances.*

Mots-clés— *Fabrication additive, conception, CAO, prototype*

I. INTRODUCTION

La fabrication additive est définie comme étant le procédé de mise en forme d'une pièce par ajout de matière, par empilement de couches successives. C'est l'ajout de ces couches qui donne sa forme à la pièce, contrairement à un procédé tel que l'usinage où c'est l'enlèvement de matière à une forme brute qui conduit à l'obtention de la forme. Nous nous intéressons ici aux pièces en matériau métallique. Plusieurs procédés permettent cet ajout de matière, parmi lesquels nous citerons essentiellement les procédés de fusion par laser, notamment le procédé « Selective Laser Melting » (SLM) [1] et le procédé de fusion par faisceaux d'électrons (EBM pour Electron Beam Melting) [2]. Ce sont les principaux procédés industriels pour fabriquer des pièces métalliques et d'alliages. Ils permettent de réaliser des pièces semblables mais, n'étant pas basés sur les mêmes principes physiques, les matériaux travaillés sont différents [3] tout comme le sont l'énergie consommée pour transformer la matière [4], les limites de formes fabricables, ou les propriétés des pièces obtenues.

Un avantage important de ce type de fabrication par addition de matière est de pouvoir obtenir des formes non

réalisables par les procédés traditionnels. La fabrication additive permet ainsi de revisiter la conception des produits mécaniques d'un point de vue fonctionnel, économique et environnemental [5]. Si de nouvelles formes peuvent être créées il reste aux concepteurs à adapter ces formes aux besoins du client final mais aussi de toutes les parties prenantes des étapes du cycle de vie des pièces. Dans les entreprises, l'avènement de ces nouveaux procédés de fabrication conduit à chercher à reconcevoir tout d'abord des pièces existantes avec des objectifs spécifiques à leurs secteurs. C'est par exemple la réduction de la masse à résistance égale pour l'aéronautique, ou la meilleure intégration de fonctions pour l'automobile

C'est la question du processus de conception des mécanismes et des pièces qui les composent pour une réalisation par procédé additif qui est au cœur de nos travaux de recherche. Quelles étapes ? Dans quel ordre ? Avec quels outils ? En s'appuyant sur quelles connaissances, sur quelles règles formalisées ou à formaliser issues des capacités et capabilités propres aux processus additifs ? Ayant sur notre plateforme technologique une machine de type EBM, c'est plus particulièrement cette technologie de fabrication que nous utiliserons pour les réalisations qui seront support à notre étude. Notre question générale est donc celle d'une méthodologie de conception mécanique pour une fabrication par une technologie additive de type EBM. Cette méthodologie devra, au sens de Estefan [6], proposer des processus (qui définissent le quoi faire, les activités et leur enchaînement), des méthodes (comment mener ces activités) et des outils (pour assister les méthodes).

Un avantage de la fabrication additive est qu'elle permet de faire des prototypes sans besoins d'outillages spécifiques, à des coûts et dans des temps relativement courts. Dans ce papier nous nous intéresserons à la reconception de pièces, au processus conduit pour cette reconception, et plus particulièrement à la place du prototype dans ce processus.

Pour répondre à ces questions, nous commencerons par une étude bibliographique sur les processus de conception, pour positionner notre recherche et affiner notre question. Puis nous préciserons notre méthodologie de recherche. Enfin, nous décrirons notre étude de cas et mettrons en évidence les intérêts du prototype dans un processus de conception pour la fabrication additive. Une conclusion nous permettra de mettre en perspective cette étude.

II. CADRE THEORIQUE

Nous nous intéressons à la reconception de pièces existantes. Le point de départ est donc un mécanisme existant, réalisant les performances attendues, et constitué de pièces obtenues par une fabrication soustractive. Ces pièces ont donc été déjà étudiées et conçues. Leurs surfaces fonctionnelles et leurs dimensions, les formes reliant ces surfaces fonctionnelles ont été dimensionnées pour résister aux efforts appliqués, être fabriquées et assemblées. L'avènement de la nouvelle technologie de fabrication additive amène à questionner l'adaptation des formes de ces pièces à cette nouvelle technologie, mais aussi au positionnement de la matière dans l'espace pour en optimiser les performances, notamment la résistance. Le processus de leur conception est ainsi remis en question. Ce travail s'inscrit donc dans le domaine de l'Engineering Change [7]. Le travail présenté ici reste très technique et orienté ingénierie mais il devra se préoccuper plus tard des implications que ces changements auront sur les aspects organisationnels de la conception.

Pour positionner notre travail, nous nous appuyons sur la définition d'un processus de conception proposé par Suh [8] dans l'Axiomatic Design. Suivant ce modèle, à partir d'un besoin à expliciter, les concepteurs doivent définir les exigences (Functional Requirements) du produit à concevoir. Suit une phase de synthèse (Ideate and create) qui conduit les concepteurs à proposer des solutions. Ces solutions sont ensuite analysées (Analyze and Test) au regard des critères de performances définis dans les exigences.

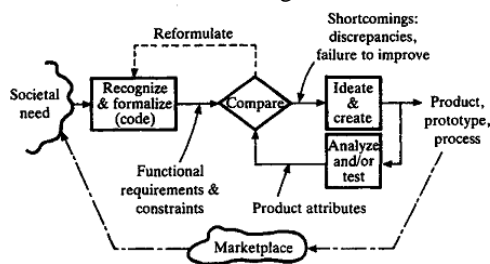


Figure 1. SUH – AXIOMATIC DESIGN

Ce modèle conduit à voir le processus de conception comme une boucle entre activités de synthèse et d'analyse et ce jusqu'à atteindre une adéquation entre les exigences et les performances des solutions envisagées. Dans cette boucle, les exigences et les solutions doivent toutes deux co-évoluer [9] [10] pour permettre de finaliser le processus.

Suivant ce modèle, notre question sur la place du prototype dans le processus de reconception pour la fabrication additive nous positionne sur l'activité d'analyse. Généralement cette phase d'analyse s'appuie sur des logiciels de calcul, notamment par Eléments Finis (EF), pour entre autres vérifier la résistance des pièces aux efforts extérieurs appliqués. Le prototype viendrait donc en concurrence avec ce type de calcul dont l'intérêt est de pouvoir être fait sur une représentation virtuelle, une simulation donnant des résultats sans avoir besoin d'un prototype de test en grandeur réelle. Nous reformulons donc notre question de recherche comme suit : Quel est l'intérêt, quels sont les apports respectifs des calculs EF et des prototypes ? Où mettre le curseur entre réalisation de

simulation numérique et fabrication de prototype ? Quelle place et quelle importance donner à l'un et à l'autre dans le processus de développement d'un produit ?

III. METHODOLOGIE DE RECHERCHE

Notre méthodologie peut être qualifiée de Case Study [11]. Différentes études portant sur la reconception de pièces existantes pour leur obtention en fabrication additive ont été menées. Ce travail a été fait en partenariat avec des industriels. Ces études de cas permettent ainsi, par les évaluations successives et expertes des différentes étapes de notre travail, de mettre en évidence les apports des calculs et prototypes dans le processus de reconception. La caractérisation de ces apports nous permet ainsi de définir des indices qui peuvent nous aider à positionner notre curseur.

Dans l'étude de cas que nous prenons comme support à ce papier, à partir d'un cahier des charges et d'une représentation CAO de la pièce initiale, nous avons utilisé des outils d'optimisation topologique et d'optimisation paramétrique pour la phase de synthèse [12]. Ceci nous a conduits à une proposition de solution décrivant la géométrie (modèle CAO) de la pièce. Puis, dans la phase d'analyse qui va nous intéresser plus particulièrement dans ce papier, la géométrie proposée a été évaluée d'une part en référence au cahier des charges fonctionnel qui représente le document formalisant les exigences fonctionnelles (FR au sens de Suh, Figure 1), mais aussi d'autre part au travers des expertises de l'industriel partenaire.

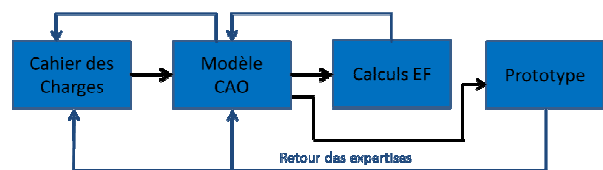


Figure 2. PHASE D'ANALYSE

La première étape de la phase d'analyse (Figure 2) a été le calcul EF. Une visualisation du résultat de ce calcul, couplée avec le modèle CAO 3D de la pièce, nous a permis un premier échange avec le client. Celui-ci a mobilisé l'expertise du concepteur bureau d'études et calcul de la pièce initiale, du designer et du chargé de projet 'introduction de la fabrication additive' pour une critique et évolution du modèle CAO représentant la pièce. Cette étape nous permet une première évaluation de la forme géométrique, de la résistance de la pièce aux sollicitations, mais aussi d'élucider des attentes non encore exprimées d'un point de vue fonctionnel pour la pièce. La deuxième étape de la phase d'analyse fut la fabrication d'un prototype testable. Ce prototype a permis d'obtenir un retour, de la part des experts côté client, complémentaire au retour de l'étape précédente par le fait qu'il permet une prise en main, une manipulation. Nous allons maintenant décrire de manière plus précise les différentes boucles conduites au cours de ces deux étapes pour caractériser les apports et les difficultés associées à chacune d'elles.

IV. ETUDE DE CAS

Dans cette étude de cas en partenariat avec un industriel, nous étudions une pièce initialement en acier, de masse 125g.

Notre objectif est la reconception de cette pièce, en alliage de Titane, avec un objectif de réduction de 40% de la masse. Nous n'en dirons pas plus pour cause de confidentialité.

A. Evaluation sur des prototypes virtuels

Le calcul EF est la première étape que nous avons menée pour analyser les solutions proposées dans la phase de synthèse. Cette étape est toujours importante dans la phase d'analyse mais elle pose certaines difficultés.

La première difficulté est la définition des conditions aux limites, qui vont conditionner la validité (fiabilité et robustesse) des résultats de la simulation. Ce moment est couteux en temps pour la définition d'un modèle des conditions aux limites qui soit le plus fidèle aux conditions réelles. La deuxième difficulté est liée à la définition du type et de la taille du maillage qui va conditionner le temps de calculs. Le résultat du calcul avec une taille de maillage plus petite est plus précis mais le temps de calcul machine est plus long. Le calcul éléments finis est ainsi fait dans un délai assez long qui inclut le temps de définition des conditions aux limites et le temps du calcul. On sait également que la précision obtenue est très relative, c'est-à-dire qu'il reste toujours un écart entre le résultat du calcul et la réalité des contraintes à cause de la définition des conditions aux limites, notamment dans les cas les plus complexes, mais aussi parfois à cause de phénomènes numériques comme des concentrations de contraintes non réelles et liées à la géométrie locale du maillage.

Nous avons donc mené une analyse par éléments finis d'une proposition de géométrie de pièce obtenue en fin de la phase de synthèse par optimisation topologique. La présentation de ce résultat au client [Figure 3], basée sur les représentations CAO et EF, a permis de discuter de ce résultat de résistance, et du poids de la pièce (76g) au regard de la diminution de poids attendue. Mais il a également permis de faire émerger certains nouveaux critères d'évaluation de la forme proposée.

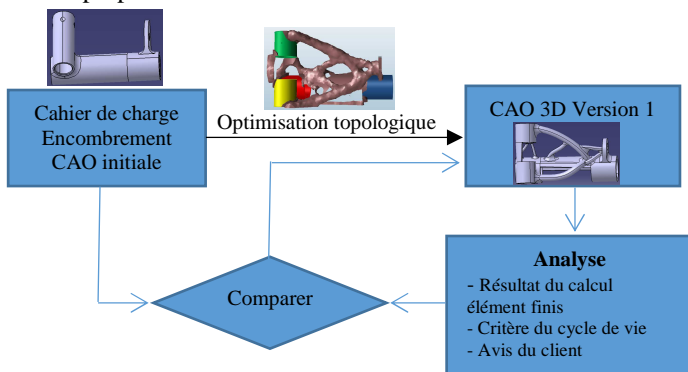


Figure 3. BOUCLE D'ANALYSE PREMIERE GEOMETRIE

Parmi les critères évoqués à partir de la représentation CAO, nous notons : un critère d'acceptabilité de la forme globale obtenue pour la pièce; un critère de complexité des formes qui questionne la contrôlabilité (dimensionnelle et de santé matière) ; un critère d'usinabilité ; des critères de fragilité à la manipulation.

Nous avons aussi fait, à la demande du client, le calcul EF de la pièce initiale, en nous basant sur sa géométrie et en le

considérant en alliage de Titane. Ceci nous a permis de déterminer ses performances de résistance au regard du nouveau matériau. Sur cette pièce, nous trouvons qu'il y a des zones sous-contraintes (zones bleues) par rapport au Re du matériau, ainsi que des zones sur-contraintes (zones rouges) [Figure 4 à gauche]. C'est-à-dire que, en se basant sur cette géométrie, nous sommes capables de minimiser la masse la pièce par le fait qu'elle est en titane (90g contre 125g en acier), mais aussi d'optimiser cette masse en enlevant de la matière dans les zones bleues. Cependant, des zones (en rouge) rencontrent des problèmes de résistance. Ce calcul montre que cette pièce initiale, en plus de répondre aux critères de contrôlabilité, d'usinabilité, d'acceptabilité des formes globales (puisque sa forme est celle de la pièce initiale), a un poids acceptable. Elle doit être renforcée dans les zones en limite de résistance, mais elle est optimisable en enlevant de la matière dans les zones non sollicitées.

La pièce optimisée topologiquement résiste elle aussi aux cas de chargements (les sollicitations dans les zones rouges sont inférieures à la limite de résistance élastique du Titane, 930 MPa) [Figure 4 à droite]. La pièce est aussi plus légère que la pièce basée sur les formes initiales et réalisée en Titane (76g contre 90g).

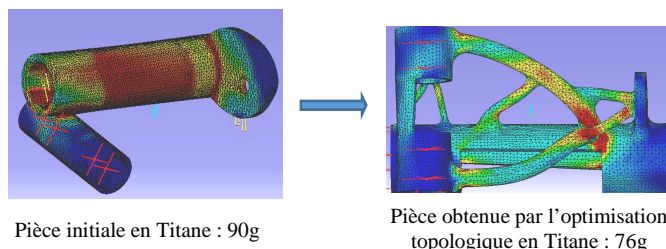


Figure 4. RESULTATS DU CALCUL ELEMENTS FINIS

A partir de ces retours, et en accord avec le client, nous avons proposé une solution intermédiaire entre les formes de la pièce initiale et celles de la pièce obtenue par optimisation topologique. Nous avons pour cela opté pour le rajout de deux poutres entre les deux cylindres, pour rigidifier leur liaison et tenter de diminuer la sollicitation dans la zone rouge de jointure entre les deux cylindres.

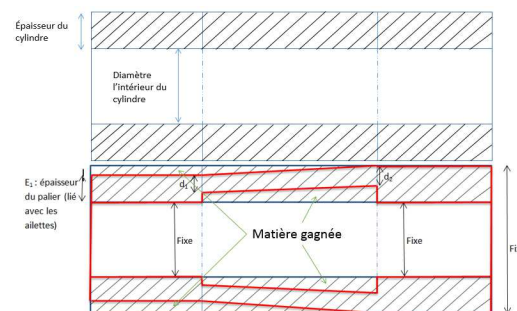


Figure 5. OPTIMISATION PARAMETRIQUE PIECE INITIALE

Puis nous avons enlevé de la matière dans la zone bleue (non sollicitée) du petit cylindre, comme sur la pièce optimisée. Enfin nous avons optimisé paramétriquement [Figure 5] le grand cylindre car des zones bleues montraient une sollicitation

faible et aussi que la pièce optimisée topologiquement faisait apparaître une zone sans matière dans ce cylindre. [Figure 3].

Suit une phase d'analyse, par les industriels, de la géométrie de la nouvelle pièce obtenue en CAO version 2 [figure 6] et des résultats du calcul EF [Figure 7].

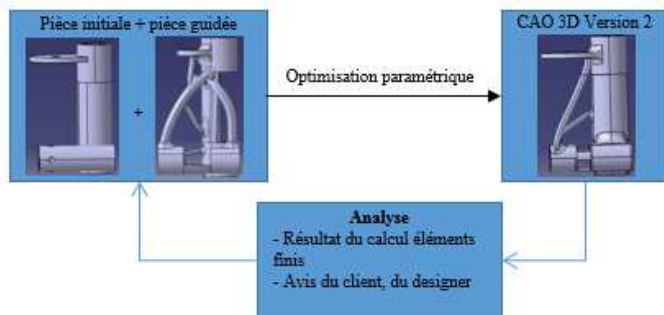


Figure 6. BOUCLE D'ANALYSE DEUXIEME GEOMETRIE

Le résultat du calcul EF [Figure 7], nous montre que les contraintes sont inférieures à la limite de résistance élastique du Titane, 930 MPa. En plus, il y a des zones bleues (moins contraintes). Le designer nous propose l'intégration des structures treillis dans ces zones (Figure 7). Notons ici que le designer souhaite explicitement que cette pièce fasse apparaître son originalité de construction par la présence de formes si possible esthétiques et non fabricables sans procédé additif. Il s'agit de 'montrer la fabrication additive' pour différencier l'entreprise de la concurrence.

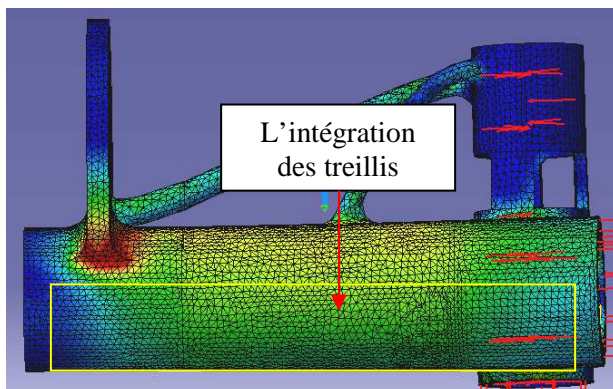


Figure 7. RESULTAT DU CALCUL ELEMENTS FINIS

Nous avons testé plusieurs types de structures : des trous en lignes, des trous en quinconce, des structures nid d'abeilles ou des treillis [figure 8]. Le treillis a été choisi au cours d'un meeting pour des raisons là encore qu'il fait plus fabrication additive. En effet, un critère de choix important parmi les différentes propositions de la figure 8 est celui d'avoir une pièce qui met bien en évidence la technologie de fabrication additive. La structure avec des trous de perçage ou en nid d'abeilles est, selon le client, trop proche d'une géométrie de fabrication soustractive. La structure treillis est 'visiblement' réalisée en additif, et c'est cette visibilité qui emporte le choix.

Les treillis sont optimisés paramétriquement avec comme variables la taille des éléments, la distance entre deux éléments. Les pièces obtenues [figure 9] ont une masse est de 69g.

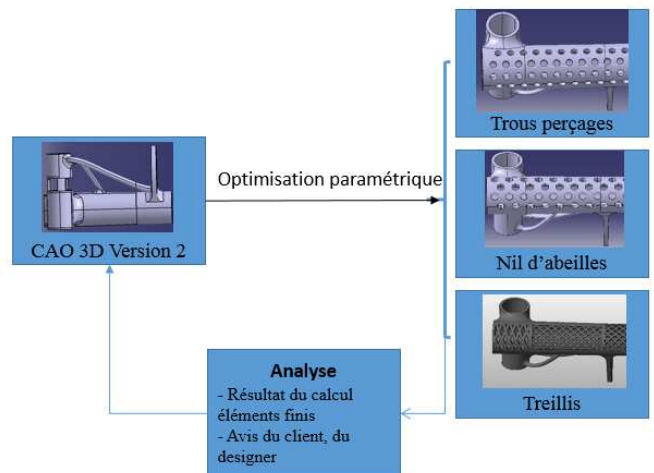


Figure 8. BOUCLE D'ANALYSE DE LA GEOMETRIE INTEGRANT DES TREILLIS

On a donc gagné 7g par rapport la pièce obtenue par optimisation topologique. Puis nous avons analysé cette géométrie, représentée par un modèle CAO 3D. Le calcul EF a confirmé la résistance de la pièce et la discussion avec le client et le designer n'a pas fait apparaître d'élément nouveau.

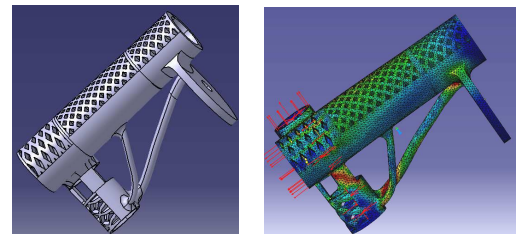


Figure 9. MODELE CAO DE LA GEOMETRIE CHOISIE

Décision est donc prise de passer à la deuxième étape dans la phase d'analyse, c'est-à-dire de fabriquer un prototype.

B. Evaluation par fabrication du prototype

Pour anticiper l'étape de finition, des surépaisseurs sont ajoutées sur les surfaces fonctionnelles, notamment les alésages intérieurs des deux cylindres. Pour fabriquer le brut, partant de la géométrie choisie, nous avons aussi décidé de la direction de fabrication (position de la pièce dans la chambre de fabrication) et de la position des supports. La fonction des supports est double : supporter les formes qui s'appuient sur le lit de poudre et permettre la diffusion de la chaleur par conduction. Ces supports pourraient avoir d'autres fonctions, notamment pour les étapes de finition, mais celles-ci ne seront pas discutées dans ce papier.

Ce premier prototype a été présenté aux clients. Pris en mains, manipulé, observé dans son aspect global et local, il a permis un retour positif de la part des experts coté client. Est cependant questionnée la rigidité globale et locale de la pièce, notamment pour ce qui concerne le petit cylindre. Par ailleurs, lors de l'opération de finition des alésages sur un centre d'usinage, nous avons été confrontés à une rupture du petit cylindre sous l'effet des efforts de coupe, mais aussi des vibrations engendrées par la coupe discontinue due à la présence du treillis. Nous avons pris la décision d'ajouter un

troisième bras, et des liens entre les deux petits paliers [Figure 10]. Une nouvelle fabrication est alors lancée.

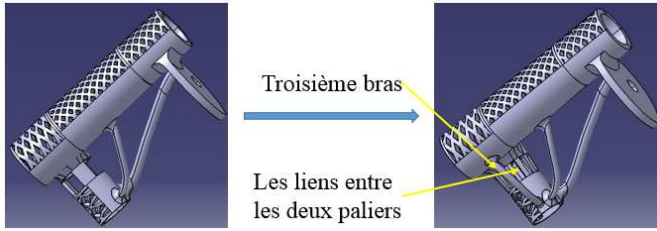


Figure 10. LES MODIFICATIONS SUIVANT LES RETOURS CLIENTS

Une étape nécessaire pour obtenir un prototype testable est donc aussi la prise en compte des opérations de finition. Durant cette étape la pièce doit être positionnée, pour permettre l'obtention des cotes fonctionnelles, maintenue et résister aux efforts de bridage et d'usinage. Ceci conduit à interroger les formes proposées et leur orientation pour implémenter cette mise en position (MIP) et ce maintien en position (MAP). Le MAP nécessite par exemple d'avoir des formes parallèles aux surfaces de MIP. Ceci conduit aussi à considérer l'usinage comme une étape du cycle de vie à prendre en compte pour la résistance de la pièce.

La pièce a été calculée en EF pour résister à l'usage, mais pas pour résister aux efforts dus à l'enlèvement de matière. Et cette résistance est d'autant plus importante à prendre en compte que la pièce est optimisée à la limite de résistance pour l'usage : *l'optimum serait d'avoir une pièce rouge (en limite de résistance) pour tous les éléments de la pièce* nous dira le client considérant le calcul EF de la pièce soumise au cas de charge d'usage.

Le prototype ainsi réalisé permet de tester la pièce dans son assemblage, sous les cas de charges en conditions réelles. Le prototype que nous avons réalisé, qui était résistant au vu du calcul éléments finis est cassé [Figure 11] lorsqu'on fait les premiers essais. Il y a des problèmes dans les zones où nous avons intégré des treillis.



Figure 11. LE PROTOTYPE CASSE

On constate donc que les calculs EF que nous avons réalisés ne sont pas valides. On peut considérer que notre résultat de calcul n'est pas bon à cause des conditions aux limites ou du type de maillage que nous avons défini. On sait que l'on peut affiner ces conditions aux limites, que l'on peut avoir des maillages plus fins. Mais la définition de modèles de conditions aux limites pour un calcul plus « juste » ou le calcul avec des maillages plus fins seraient plus coûteux en temps, sans certitudes pour le résultat. Par ailleurs, quelle est la fiabilité du calcul notamment dans les zones incluant des poutres fragiles ou des structures treillis ? Si la résistance calculée au cœur des éléments peut être juste, qu'en est-il des zones en limites de matière qui sont nombreuses dans le cadre des treillis ? La pièce a d'ailleurs cassé dans une zone treillis où il était censé

ne pas y avoir de problème de résistance au regard du résultat de calculs.

Dans la mesure où la mise en place d'un prototype est envisageable sans outillage spécifique, par simple ajout dans une chambre de fabrication (build) non complète en même temps que la fabrication d'autres pièces (donc avec un surcoût relativement faible), se pose la question (d'un point de vue technique et économique mais aussi scientifique) de l'équilibre entre le raffinement du calcul EF et la réalisation d'un prototype pour la validation de la résistance en conditions réelles de chargement.

Suite à ce bris de pièce, nous avons donc fait des modifications du premier prototype à partir de la prise en compte des expertises du client, du concepteur, des experts mécaniciens et usineurs. Nous nous sommes concentrés sur les zones qui ont posé des problèmes dans la phase de réalisation et d'essai du prototype. Nous avons ajouté de la matière radialement dans les zones formées de treillis. Nous avons joué avec la taille des treillis, le diamètre d'alésage du cylindre, les différentes formes pour le volume de liaison entre les deux paliers du petit cylindre.

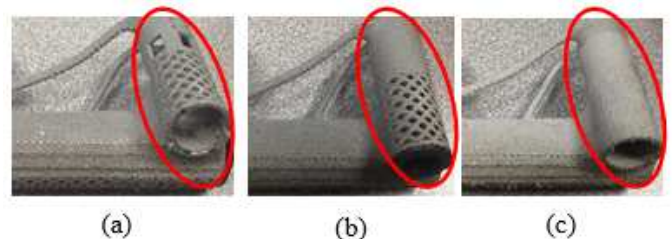


Figure 12. LES DIFFERENTES VERSIONS DU PROTOTYPE TESTABLE

Nous avons obtenu trois versions testables du prototype [Figure 12]. Nous avons ensuite réalisé ces différents prototypes en une seule fabrication. Là encore, on profite de l'avantage de cette technologie (en l'occurrence EBM) qui permet de réaliser sans outillage spécifiques différents bruts dans la même chambre de fabrication. Après finition et essai, la version (a) a été cassée et les deux autres versions résistent aux cas charges en situation d'usage et en situation d'usinage. Nous avons finalement choisi la version (b) à cause de la masse de cette version, plus légère, et de sa forme plus représentative d'une fabrication additive grâce au treillis.

V. SYNTHÈSE DE L'ÉTUDE DE CAS ET DISCUSSION

L'étude de cas présentée ici met en évidence trois objets au centre de l'activité d'analyse au sens de Suh : le modèle CAO, les représentations issues du calcul éléments finis et le prototype.

Le modèle CAO permet de décrire la géométrie de la pièce. Il donne accès à la complexité de ses formes et supporte la formulation d'exigences spatiales (*i.e.* position relative des volumes) et dimensionnelles (*i.e.* encombrement, épaisseur mini). Il a permis l'émergence de critères d'acceptabilité, de contrôlabilité et de fragilité potentielle. Il a aussi permis de questionner très tôt l'usinabilité. Mais pour ces derniers il ne permet qu'une évaluation qualitative. Il permet aussi le calcul du poids (par le volume) qui est un objectif prioritaire.

La représentation issue du calcul EF permet d'obtenir une carte de contraintes. Il suggère ainsi des zones où l'on peut enlever de la matière, ou intégrer des structures treillis, pour gagner de la masse, ce qui serait très difficile de manière purement intuitive ou même en se basant sur le savoir-faire des experts. Mais le résultat du calcul EF dépend des choix effectués par l'expert qui définit les conditions aux limites et du temps de calcul admissible dans le contexte du projet. La validité des résultats dépend grandement du temps passé pour définir les conditions aux limites et du temps de calcul nécessité par la finesse du maillage envisagé.

Le prototype permet l'accès à l'aspect local (*i.e.* état de surface) et global (*i.e.* rendu) réel de la pièce. Il permet la manipulation et le regard sous différents points de vue, permettant d'évaluer l'acceptabilité de façon complémentaire à la CAO. Il permet de tester et mesurer des performances tant au niveau du produit que de son processus d'obtention. Il donne accès à la rigidité/fragilité des pièces de manière qualitative ou/et quantitative. La réalisation du prototype est possible sans outillage spécifique et dans un temps assez court, comparable au temps de calcul EF. Il donne un retour sur l'usinabilité, tant concernant les surfaces de MIP et MAP que sur la résistance aux efforts d'usinage. Cependant il a un coût qu'il faudrait chiffrer.

Ces constats nous montrent l'importance des trois représentations dans le processus de conception. Ils permettent de caractériser leurs rôles d'objets médiateurs et de définir des facteurs qui influencent leurs moments d'implémentation dans le processus de conception. On s'aperçoit par ailleurs que la représentation CAO est loin d'être neutre et que la position du curseur n'est pas simplement entre calcul EF et prototype mais doit inclure l'apport du modèle CAO. On peut quand même constater que dans notre cas d'étude et dans un contexte d'optimisation exacerbé, le prototype permet de mesurer des performances que l'on atteint que très approximativement par le calcul sur modèle numérique. La question qui reste posée est celle de la nécessité de ce prototype ou de la définition de représentation(s) concurrentes permettant d'avoir des réponses que nous apporte actuellement ce prototype.

VI. CONCLUSION

Notre question de recherche était celle des intérêts respectifs des calculs EF et des prototypes dans un processus de reconception de pièce à réaliser par fabrication additive, EBM pour ce qui nous concerne. Où mettre le curseur entre réalisation de simulation numérique et fabrication de prototype ? Les études de cas que nous avons menées, dont l'une est présentée dans ce texte, montrent que trois représentations jouent un rôle de média important dans l'analyse des propositions par les experts en charge de prendre des décisions : le modèle CAO, le résultat du calcul EF et le prototype. Nous avons pu mettre en évidence des points clés associés au rôle de chacune de ces trois représentations. La technologie de fabrication additive remet cependant en cause la prépondérance de la représentation issue du calcul numérique

dans la mesure où les résultats obtenus par calcul EF ne sont pas complètement fiables et où le prototype est réalisable dans un temps équivalent au calcul, et à un coût acceptable même s'il est à quantifier plus finement. Reste la question du prototype comme représentation pour répondre aux manques constatés sur les représentations actuelles. Il faudrait cependant confirmer ces résultats sur des études complémentaires, dans divers contextes d'optimisation, et voir comment les outils de calcul vont évoluer et s'adapter à ces nouvelles conditions. En perspective, outre affiner la détermination de critères pour placer le curseur entre le calcul EF et prototype, se pose la question de la définition de processus de conception de pièces pour la fabrication additive.

VII. REFERENCES

- [1] D.D. Gu, W. Meiners, K. Wissenbach, R. Poprawe. "Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms", International Materials Reviews, Published by Maney for the Institute and ASM International, Vol. 57, 2012, N°3, pp. 133-159.
- [2] M. F. Zäh, S. Lutzmann. "Modelling and simulation of electron beam melting", Production Engineering, 2010, Volume 4, Number 1, Page 15-23.
- [3] L.E. Murr et al. "Metal Fabrication by Additive Manufacturing Using laser and electron Beam Melting technologies", Invited Review, J. Mater. Sci. Technol., 2012, 28(1), pp. 1-14.
- [4] M. Baumann, C. Tuck, R. Hague, I. Ashcroft and R. Wildman. "A comparative study of metallic additive manufacturing", 2010.
- [5] S. H. Huang, P. Liu, and A. Mokasdar, "Additive manufacturing and its societal impact: a literature review", The International Journal of Advanced manufacturing Technology, Vol. 67, Issue 5-8, 2013, pp. 1191-1203.
- [6] J. Estefan, Survey of model-based system engineering (MBSE) methodologies, INCOSE MBSE, 2008
- [7] T.A.W. Jarratt, C.M. Eckert, N.H.M. Caldwell, P.J. Clarkson. Engineering change: an overview and perspective on the literature", Research in Engineering Design, Vol. 22, Issue 2, 2011, pp. 103-124.
- [8] Suh, N., 2001. Axiomatic design: advances and applications, MIT, Oxford University press, USA
- [9] P. Lonchamp. "Co-évolution et processus de conception intégrée de produits: Modèle et support de l'activité de conception", Engineering Sciences, Institut National Polytechnique de Grenoble – INPG, 2004.
- [10] Maher M.L., Tang H.T., « Co-evolution as a computational and cognitive model of design », *Research in Engineering Design*, 14, 1, 47-64, 2003.
- [11] Jennifer Rowley. "Using case studies in research", Management Research News, Vol. 25, ISS.1, pp. 16-27.
- [12] P.T. Dautre, T.H. Vo, F. Pourroy, P. Marin, G. Prudhomme, F. Vignat, Optimisation topologique: outil clé pour la conception de pièces produites par fabrication additive ?, Actes du 14^{ème} Colloque AIP-Primeca, La Plagne, 2015